黑洞—從幻想到現實

湯兆昇博士
香港中文大學物理系

（本文為筆者於 2003 年 8 月 23 日於香港太空館公開講座之摘要，
其中部份內容曾刊登於太空館 2003 年 10 月通訊）

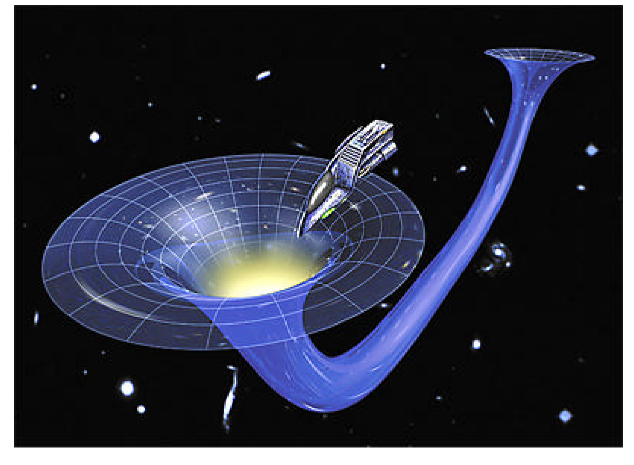


圖 1 畫家筆下的蟲洞。太空船進入蟲洞，然後從另一個時空中走出來。

提起黑洞，大家或許會想起「蟲洞」、「時光隧道」等帶有濃厚科幻色彩的概念。在科幻小說和電影中，太空船可能以黑洞為入口，並通過「蟲洞」穿越時空，然後在另一個宇宙的空間走出來。即使廣義相對論方程允許所謂「蟲洞」的解，現代大部份天文學家對於這些時空穿梭的概念並沒有多大的興趣，原因是他們在宇宙中既找不到能有效形成「蟲洞」的機制，也沒有任何方法可以透過天文觀測驗證「蟲洞」的存在。而且，現代的一些理論研究也表明，「蟲洞」即使存在，也是非常不穩定的，即使極少的物質經過，也會使它立刻塌縮。所以到目前為止，利用黑洞時空穿梭等概念只可以被視為科幻作品的題材，而不屬於認真科學研究的範疇。

除去了一些無法驗證的猜想，近年來天文學家對黑洞的研究興趣卻有增無減。是甚麼新發現促使天文學家努力不懈地鑽研有關黑洞的一切？研究黑洞對了解宇宙的演化又有甚麼幫助？

早在十八世紀，拉普拉斯（Laplace）等人已經提出了密度極高的天體可能會使附近的光線不能逃離的構想。愛因斯坦在二十世紀初發表了廣義相對論後不久，史瓦西（Karl Schwarzschild）便利用廣義相對論方程求得一個描述球對稱天體附近時空結構的解，為黑洞的研究展開了序幕。後來奧本海默（J Robert Oppenheimer）等人透過計算，證明大質量星體在重力塌縮下必定會形成黑洞。潘羅斯（Roger Penrose）證明了奇點定理，預言物質在黑洞的中央會被壓縮成無窮小的奇點。數學家克爾（Roy Kerr）求得旋轉黑洞的廣義相對論方程解。霍金（Stephen Hawking）推論出黑洞會非常緩慢地「蒸發」。在七十年代，天文學家才開始有系統地透過觀測，在雙星系統中尋找黑洞存在的證據。到了二十世紀末，哈勃太空望遠鏡升空，大量的觀測證據湧現，不但使我們更加確信黑洞的存在，而最令人驚奇的是，黑洞的存在形式和產生機制，遠比我們想像

中的多和複雜。不同類型的黑洞，其大小竟然可以由幾個太陽質量至幾十億個太陽質量不等！更重要的是，這些不同類型的黑洞的存在和與它們相關的天文現象，往往為人類揭示了恆星、星系以至整個宇宙演化的奧秘。

人們最早透過觀測雙星系統尋找黑洞存在的證據。如果發現一顆恆星與一顆黑暗的天體互相繞著對方旋轉，而從光譜分析軌道，發現黑暗天體的質量大於太陽的 3 倍，那麼這個黑暗天體便很有可能是一個黑洞。我們以質量大於太陽的 3 倍作為判別黑洞的標準，是因為從理論上得知，其他致密天體（如中子星）的質量都不可能超越這個上限，否則它們便會因為本身的重力而塌縮成黑洞。不過，從光譜分析以決定黑暗的伴星的質量並不是一項容易的觀測工作。過去天文學家往往因為無法準確量度可見恆星的光度和軌道傾斜度等因素而錯誤地估計了黑暗天體的質量。另一個重要的觀測對象是致密天體因為吸食伴星物質而形成的吸積盤。對於中子星和黑洞來說，龐大的重力使吸積盤內的物質因摩擦而溫度大幅上升，發出很高能量的 X 射線。觀測星空中的 X 射線源成為尋找雙星系統中的中子星或黑洞的最重要方法。近年天文學家利用觀測 X 射線的衛星，對於分辨中子星和黑洞取得很大的進展。中子星和黑洞的重要不同之處，是中子星有一個固體表面，而黑洞則沒有。研究發現，在雙星系統中，伴星的物質掉落中子星的表面時會釋放巨大能量，而物質掉落黑洞時，則會與它所擁有能量一同消失於視界之中；因此含有中子星的雙星系統所發出的 X 射線強度總是較高，而光譜也有不同的特徵。事實上，黑洞在吸積物質過程中所吞噬的能量，可能較過程中所輻射的能量高出百倍。天文學家已經幾乎可以肯定很多 X 射線雙星所包含的黑暗天體是黑洞而非中子星，其中最著名的例子包括天鵝座 V404 等。

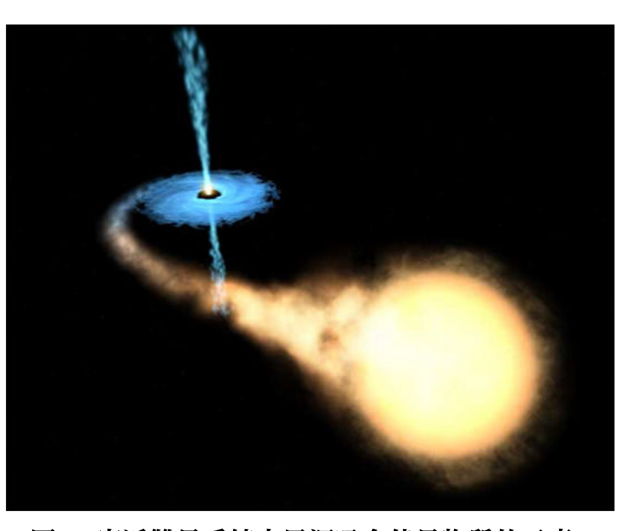


圖 2 密近雙星系統中黑洞吸食伴星物質的示意圖。物質在黑洞周圍形成吸積盤，摩擦力使盤內物質的溫度大幅上升，發射 X 射線等高能輻射。(STScI/NASA)

長久以來，黑洞的視界及種種與之相關的奇怪現象都只是一些理論上的推論。不過，近年哈勃太空望遠鏡的觀測確實為黑洞視界的存在提供了一些證據。研究人員分析了極大量來自致密天體天鵝座 XR-1 的紫外線輻射，發現其中兩組數據顯示，輻射脈衝的週期隨時間縮短，而其強度則隨時間衰減至消失，這現象與一些物質在接近黑洞視界時繞著黑洞急促旋轉，放出的輻射因為重力紅移而衰減的情況相符。雖然目前的觀測技術尚未允許我們直接看到黑洞的視界，

所以有關黑洞產生的重力紅移或者類似的觀測結果都不是決定性的，但這些結果無疑會成為連繫黑洞理論和實際觀測的重要橋樑。

天文學家一直依賴黑洞吸食物質時所發出的輻射，作為探測黑洞的唯一線索。不過近年發現孤立黑洞的存在證據所使用的方法，正好打破了這觀測上的限制。研究人員分析了很多銀河系核心方向的星光，發現在兩個事例中，恆星的光度在幾百日內增加了，然後又回復之前的水平。分析顯示，這很可能是因為有一個黑洞在恆星前面經過，黑洞的引力會聚了星光，就像凸透鏡把光線聚焦一樣，使恆星的視亮度增加。這就是所謂「微重力透鏡」效應了。黑洞可以孤立地存在，暗示著黑洞並不一定需要存在於雙星系統，而可以透過孤立的大型恆星的重力塌縮而產生，這正是一直以來恆星演化理論所預期的結果。

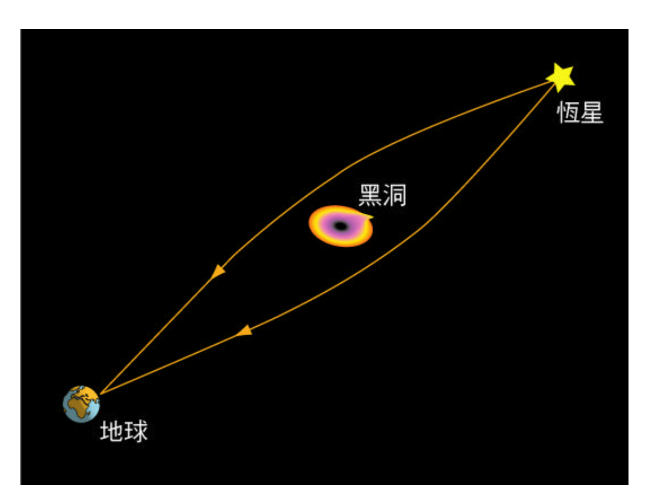


圖 3 微重力透鏡示意圖。星光經過黑洞附近時被重力扭曲，黑洞就像一塊凸透鏡一樣，把星光會聚。從地球上看，恆星的光度便會因為黑洞的經過而突然增加了。

哈勃太空望遠鏡帶來其中一項最令人振奮的發現，是確認了天文學家長久以來關於星系核心存在「超級黑洞」的猜想。很多所謂「活躍星系」的核心都會發出能量極龐大的無線電輻射，或擁有高能粒子噴流、雙瓣無線電輻射源等結構。唯一能夠解釋這巨大能量源頭的理論，就是在星系核心有一個正在吸食物質的超級黑洞。利用哈勃太空望遠鏡，天文學家發現了很多活躍星系核心附近都擁有一個以高速轉動的氣體盤，其旋轉速度可達每秒鐘數百公里。這正是核心黑洞吸食物質的特徵。根據氣體的旋轉速度，天文學家可估計核心不可見的物

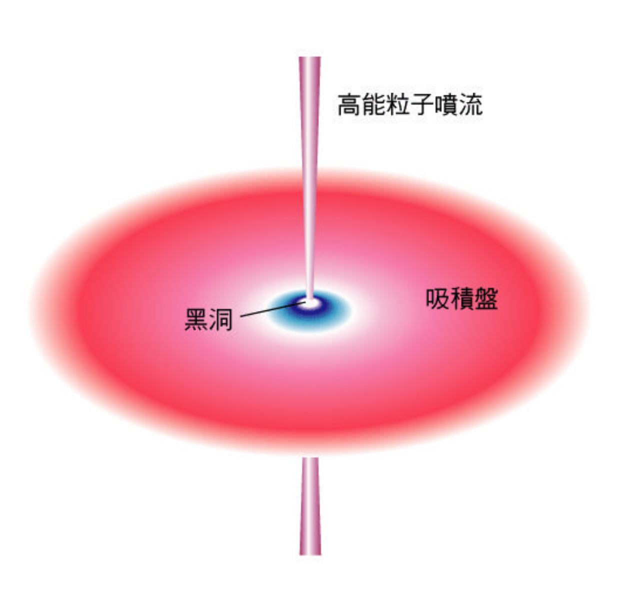


圖 4 超級黑洞理論解釋了活躍星系中心的能量來源。物質不斷沿旋轉的路徑被吸積進入黑洞，產生高熱和巨大的能量。受磁場影響的氣體垂直於吸積盤向外以高速噴射，成為一些活躍星系中常見的噴流和輻射瓣。

質的質量。其中最著名的例子是 M87 橢圓星系，星系中心發出能量極高的噴流，從核心氣體盤的轉速估計，核心的黑暗質量竟達 24 億太陽質量！另外一個著名的例子是 NGC4261 星系，它擁有巨型的雙瓣無線電輻射源，核心的高速氣體盤顯示，它的中心擁有高達 12 億個太陽的黑暗質量！雖然目前的技術還未可以使我們直接觀測到超級黑洞的存在，但天文學家認為，超級黑洞是現時唯一可以解釋這些現象的理論。如果連這個理論也不能成立，那麼星系的核心所蘊藏著的，就只會是比黑洞更怪異、更匪夷所思的東西了。除了活躍星系外，一般正常星系的核心，甚至是我們身處的銀河系，也發現懷疑是超級黑洞的黑暗質量，不過這些黑洞的質量遠比活躍星系的黑洞小，一般只在百萬太陽質量的數量級。

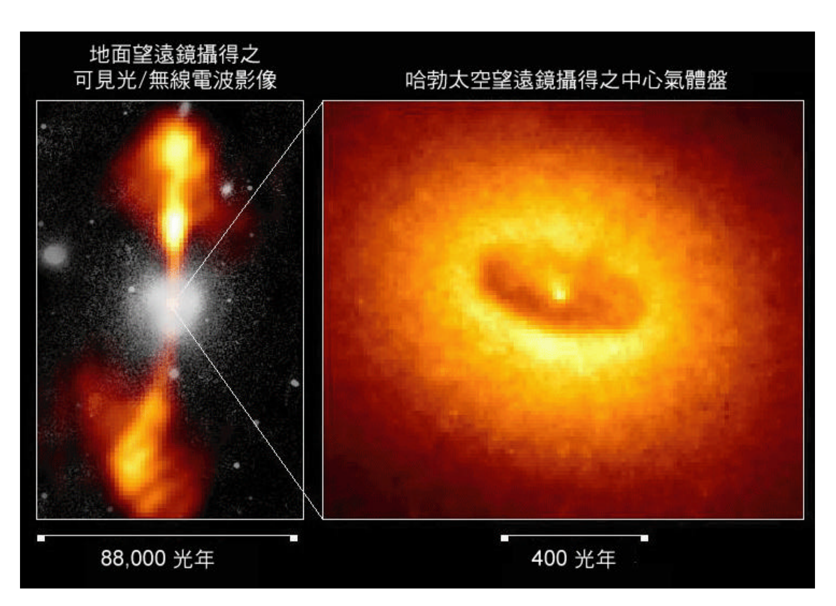


圖 5 NGC4261 星系擁有兩片巨大的無線電發射源 (左圖)，星系中心附近擁有高速旋轉的氣體盤 (右圖)。(STScI/NASA)

除了恆星演化而成的小黑洞，和星系核心的超級黑洞外，天文學家還發現了一些球狀星團的中心存在著不可見的質量，有可能是幾千至幾萬個太陽質量的「中型黑洞」。研究人員應用了新的觀測技術，可由星團中恆星的運動速度分佈直接推斷中心的黑暗質量，而不需要依靠氣體轉盤的存在。如果屬實，黑洞的存在就更為普遍了。研究也發現，星團或星系的質量總是和中心黑洞的質



圖 6 天文學家相信一些球狀星團的中心，例如 M15 星團和仙女座大星系 M31 的 G1 星團，都可能藏有質量由幾千至幾萬個太陽質量的「中型黑洞」。(NASA, The Hubble Heritage Team (AURA/STScI) and M. Rich (UCLA))

量成正比。也就是說，越龐大的恆星集團，中心就擁有質量越大的黑洞。這結果正好暗示著星團和星系之間有著深遠的連繫。天文學家相信，在宇宙的演化過程中，恆星和星團可能比星系更早形成。在早期的劇烈碰撞中，星團可能互相融合成星系，星系的融合又產生更大的星系。在融合過程中，中心的黑洞也會融合，並在星系引力拉扯的協助下，吸食更多物質，產生更大的黑洞。換句話說，在宇宙開始不久時，星團中心的中型黑洞，可能就是今天星系核心超級黑洞的種子！

在 2002 年，天文學家結合了陳德拉 X 射線天文台（Chandra X-ray Observatory）和哈勃太空望遠鏡的觀測結果，利用電腦預測星系 NGC6240 核心兩個超級黑洞未來的融合過程。以光學觀測，NGC6240 核心的形狀就像一隻蝴蝶，它之所以這樣古怪，是因為它其實是兩個旋渦狀星系互相碰撞的結果。X 射線的觀測顯示，星系核心有兩個相距 3000 光年的 X 射線源，很可能是兩個碰撞星系核心的超級黑洞所造成的。兩個超級黑洞正沿著螺旋形的軌道互相接近對方。估計在數十億年後，它們便會對撞，融合成一個更巨型的超級黑洞。

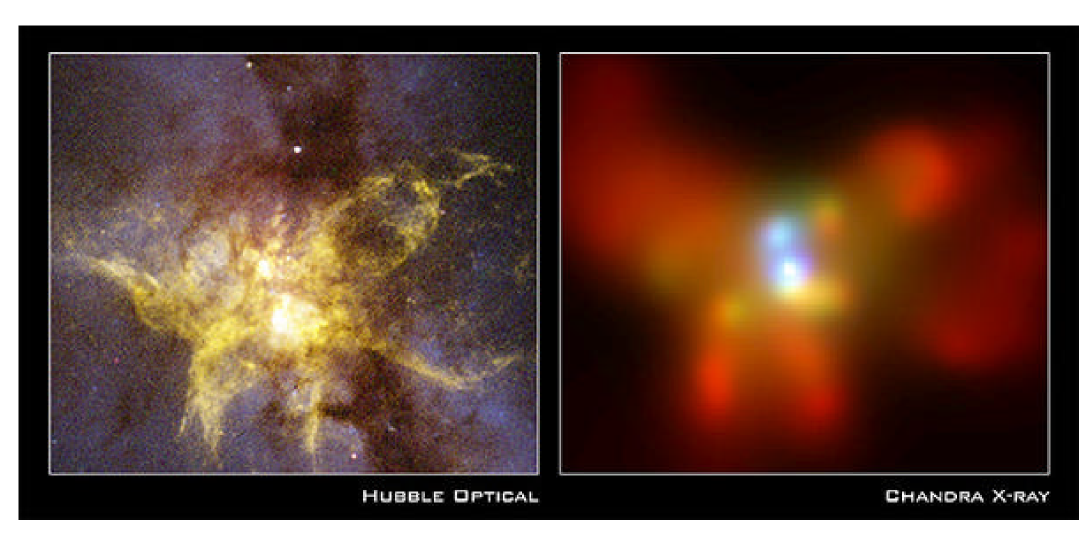


圖 7 利用哈勃太空望遠鏡（左）和陳德拉 X 射線天文台（右）所觀測得的 NGC 6240 星系中心。右圖中央的兩個藍色區域，相信就是兩個超級黑洞所產生的 X 射線源。(NASA/STScI/CXC)

黑洞是研究廣義相對論的重要場所。廣義相對論其中一項最重要的預言是，不斷變化的強大重力場會產生重力波。重力波是一種時空扭曲的波動。如果把時空比喻作一塊繃緊的橡皮，大質量物體在橡皮上的運動，便會使橡皮振動，並產生一些不斷向外傳播的皺紋，這就有點類似重力波在時空中的傳播了。長久以來，科學家都希望能早日直接探測到重力波的存在，作為對廣義相對論的一個驗證。很多天體系統都會發射可探測的重力波，其中包括雙中子星（即兩顆中子星互相繞對方旋轉）、中子星對撞融合為黑洞、黑洞或超級黑洞的對撞等。能量越大的天體系統所發出的重力波能量也越強，很自然地成為研究的焦點。在地面上興建的重力波天文台 LIGO (**L**aser **I**nterferometer **G**ravitational-wave

Observatory) 於 2002 年已經開始啟用，主要是探測小型的重力波源。不過到目前為止，我們尚未探測到重力波。美國太空總署其另外一項最重要的計劃，是在 2011 年左右把一個名為 LISA (Laser Interferometry Space Antenna) 的重力波天文台送上太空，放在地球繞日的軌道附近。LISA 將會集中探測極遙遠的高能量重力波源，包括星系核心的超級黑洞對撞，以及宇宙早期膨脹所產生的重力波等。重力波的輻射形式將會直接揭露重力波源周圍的時空結構，因此探測這些重力波的實驗，將會成為有史以來對廣義相對論的最嚴格檢證。

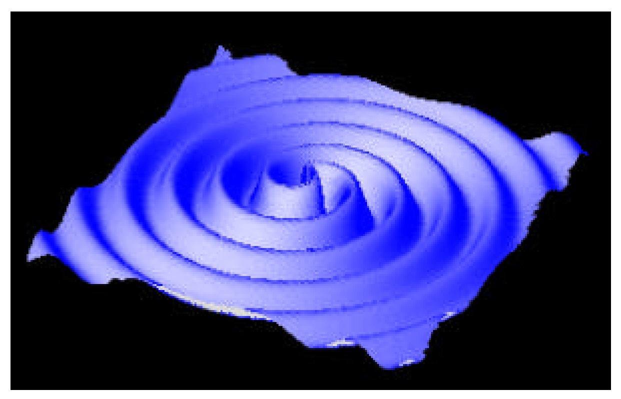


圖 8 重力波的示意圖。如果把時空比喻作一塊橡皮，重力波就好像在橡皮上向外傳播的皺紋。(NASA)

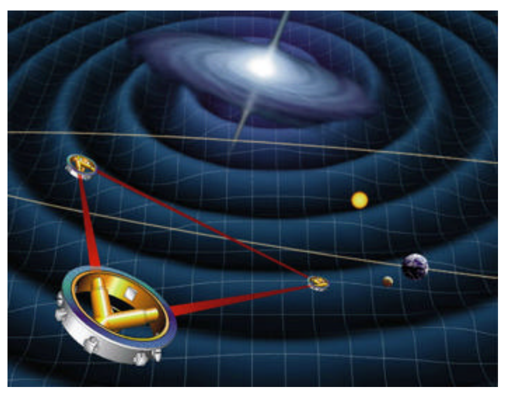


圖 9 重力波天文台 LISA 的示意圖。LISA 將會被放置於地球繞日的軌道附近，以探測來自宇宙深處的重力波。(NASA)

甚麼是宇宙開始以來能量最龐大的爆發呢？天文學家估計，這可能是星系核心的超級黑洞對撞了。超級黑洞對撞會釋放極巨大能量，其功率可達 10^{52} W 的數量級，比全宇宙所有恆星的輻射功率加起來還要高一百萬倍！這些能量主要不會通過電磁波輻射出來，而是幾乎全部由重力波帶走！可能在十多年後，重力波天文台 LISA 將會首次帶領人類目睹這類創世以來能量最龐大的爆發所發放的餘輝。

在 2003 年，天文學家利用陳德拉 X 射線天文台觀測了極遙遠的 X 射線源。當中一些 X 射線源，用光學望遠鏡竟無法看見它們對應的物體。天文學家懷疑，這些 X 射線源可能是一些極遙遠的星系中心的超級黑洞。如果屬實，這些將會是人類有史以來觀測到最遙遠的星系。越向宇宙深處觀望，代表我們越往遠古追索。這些星系，可能只是宇宙誕生後五至十億年內的產物（現在宇宙的年齡是 137 億歲）！

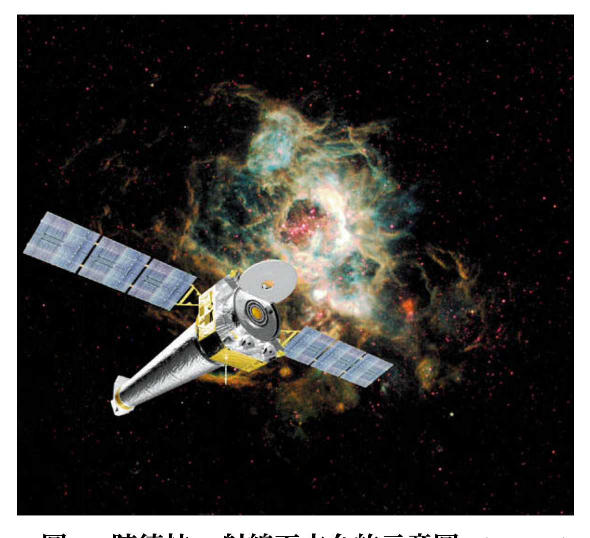


圖 10 陳德拉 X 射線天文台的示意圖。(NASA)

利用陳德拉 X 射線天文台所作的觀測，可能只是深入研究黑洞 X 射線源的開始。不到十年後，美國太空總署將會發射新一代的 X 射天文台到太空。這些名為星座-X（Constellation-X）的太空船，可以提供的觀測精確度會比陳德拉 X 射線天文台高幾十至一百倍。它也可以提供更高的時間解像度，以追蹤物質掉入黑洞時發出的 X 射線隨著時空扭曲的變化，進一步確認視界等時空結構，甚至可藉此量度超級黑洞的質量和角動量。那時我們可能藉著這些來自遙遠黑洞的數據，建立超級黑洞的演化理論，了解星系形成和演化的秘密。



圖 11 星座-X 天文台的示意圖。(NASA)

無疑，新一代的儀器將會協助天文學家發現更多各式各樣的黑洞。如此說，黑洞的數量可能多得比現時所知的更令人難以想像。各類黑洞大小差異之大，所涉及的天文現象之多，使它們成為宇宙中獨一無二的神秘天體。離開幻想，回到現實，我們發現宇宙的真正面貌往往比我們所能想像到的更複雜、更怪異、更神秘。能夠開放心胸，勇於接納現實，但同時又能保持赤子之心，不斷提出新的問題，細心找尋出路，這就是科學研究的精神了。